

哀牢山常绿阔叶林优势树种热值与养分特征

杨国平^{1,2}, 巩合德^{1,2,3}, 郑 征¹, 张一平¹, 刘玉洪^{1,2}, 鲁志云^{1,2}

(1. 中国科学院 西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303; 2. 中国科学院 哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南 景东 676209; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 测定了云南省哀牢山国家级自然保护区常绿阔叶林 6 种优势植物各器官的热值、养分和灰分。结果表明: 6 种植物各器官的干质量热值和灰分因种而异, 且同种植物不同器官之间热值存在明显差异。6 种植物各器官的干质量热值变化范围是: 叶 $19.01 \sim 23.41 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 枝 $19.22 \sim 21.47 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 皮 $18.22 \sim 21.24 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 干 $19.32 \sim 21.27 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 根 $18.89 \sim 20.90 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$; 6 种植物平均干质量热值大小顺序为木果柯 *Lithocarpus xylocarpus* > 南洋木荷 *Schima noronhae* > 黄心树 *Machilus bombycina* > 景东冬青 *Ilex gintungensis* > 蒙自连蕊茶 *Camellia forrestii* > 变色锥 *Castanopsis rufescens*, 去灰分热值大小顺序为木果柯 > 黄心树 > 南洋木荷 > 景东冬青 > 变色锥 > 蒙自连蕊茶, 都和植物的优势度顺序没有关系。表 4 参 22

关键词: 森林生态学; 常绿阔叶林; 热值; 灰分; 养分; 哀牢山国家级自然保护区

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2010)02-0251-08

Caloric values and ash content of six dominant tree species in an evergreen broadleaf forest of Ailaoshan, Yunnan Province

YANG Guo-ping^{1,2}, GONG He-de^{1,2,3}, ZHENG Zheng¹, ZHANG Yi-ping¹, LIU Yu-hong^{1,2}, LU Zhi-yun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; 2. Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong 676209, Yunnan, China; 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To study the characteristic of the caloric value and ash content of dominant tree species in an evergreen broadleaf forest in Ailaoshan National Nature Reserve, Yunnan Province, the caloric value and ash content of six dominant tree species: *Lithocarpus xylocarpus*, *Schima noronhae*, *Machilus bombycina*, *Ilex gintungensis*, *Camellia forrestii*, and *Castanopsis rufescens*, were analyzed respectively on leaves, branches, trunks, trunk barks, and roots by sampling in the field and analyzing in the laboratory. Results showed ranges of gross caloric value of six dominant species were (in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) $19.0 - 23.41$ for leaves, $19.22 - 21.47$ for branches, $18.22 - 21.24$ for trunk bark, $19.32 - 21.27$ for trunks, and $18.89 - 20.90$ for roots. Tree gross caloric value ranked: *L. xylocarpus* > *S. noronhae* > *M. bombycina* > *I. gintungensis* > *C. forrestii* > *C. rufescens*, whereas the rank of ash-free caloric values was: *L. xylocarpus* > *M. bombycina* > *S. noronhae* > *I. gintungensis* > *C. rufescens* > *C. forrestii*. Both gross caloric values and ash-free caloric values were not consistent with the sequence of the importance value of these tree species. The caloric value were correlated remarkably with ash content ($P < 0.01$). [Ch, 4 tab. 22 ref.]

Key words: forest ecology; evergreen broadleaf forest; caloric value; ash content; nutrient; Ailaoshan National Nature Reserve

收稿日期: 2009-03-02; 修回日期: 2009-04-25

基金项目: 云南省科学技术应用基础研究计划面上资助项目(2006C0058M)

作者简介: 杨国平, 助理工程师, 从事森林生态学研究。E-mail: alsygp@yahoo.com.cn。通信作者: 郑征, 副研究员, 从事森林生态学研究。E-mail: zhengz@xtbg.ac.cn

热值是植物干物质完全燃烧所释放的能量值,反映了植物光合作用中固定太阳辐射能的能力^[1]。对植物的不同器官热值和灰分与营养元素特性的研究,最重大意义在于能反映组织各种生理活动的变化和植物生长状况的差异,各种环境因子对植物生长的影响,可以从热值和养分的变化上反映出来,热值可作为植物生长状况的一个有效指标^[2]。植物组分或器官热值的差异不仅与营养物质组成、结构功能和年龄等自身因素有关,还受光强、日照长短及土壤理化性质等外界因素的影响,因此,在衡量不同植物种类间的热值高低时不能仅比较某一重要组分(如叶)^[3-4]。近年来,植物热值与营养元素的关系^[5-7],以及热值在植物不同器官中的分配研究^[8]较多。目前,国内还很少见到关于亚热带常绿阔叶林不同植物各器官热值与养分和灰分含量的相关关系研究的文献报道。本研究对哀牢山自然保护区原始森林中6种优势树种的根、干、皮、枝和叶等器官的热值、营养成分和灰分质量分数进行了测定,以探讨这些植物器官间的热值变化规律和灰分质量分数特征,丰富原始森林内能量生态学的研究,并为研究这一地区森林生态系统的结构和功能提供基础资料,也为哀牢山国家级自然保护区的开发、利用和保护提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于哀牢山国家级自然保护区核心区的徐家坝地区,地理位置为24°32'N, 102°01'E,海拔为2 400~2 600 m。根据哀牢山森林生态系统研究站的资料,研究区域平均年降水量为1 931 mm,干雨季分明,雨季(5-10月)降水量占年降水量的85%,年平均蒸发量为1 485 mm。年平均气温为11.3℃,最热月(7月)气温为16.4℃,最冷月(1月)气温为5.4℃,无霜期200 d。成土母质由片岩、片麻岩和闪长岩组成,多发育为典型的黄棕壤,土壤肥沃,偏酸性(pH 4.4~4.9),土壤表面由凋落物层(厚度3~7 cm)覆盖,土壤有机碳、全氮和全磷质量分数分别为129.1, 5.2和0.6 g·kg⁻¹,土壤表面的碳氮比(C/N)为14.4, 30~50 cm层碳氮比为15.3^[9]。

哀牢山常绿阔叶林为原生群落,林冠高度郁闭,叶面排列非常复杂,可明显分为乔木层、灌木层和草本层。乔木层优势种为变色锥 *Castanopsis rufescens*, 木果柯 *Lithocarpus xylocarpus*, 蒙自连蕊茶 *Camellia forrestii*, 南洋木荷 *Schima noronhae*, 黄心树 *Machilus bombycina* 和景东冬青 *Ilex gantungensis* 等,树高多在25 m以上,最高可达32 m,郁闭度在0.8以上。灌木层组成种较为丰富,以箭竹 *Sinarundinaria nitida* 为主,盖度在35%左右。草本植物以滇西瘤足蕨 *Plagiogyria communis* 和细梗藎草 *Carex teinogyna* 等为主。附生植物相当丰富,以黄杨叶芒毛茛苔 *Aeschynanthus buxifolius* 和鳞轴小膜盖蕨 *Araiostegia perdurans* 等为主。藤本植物常见,主要有冷饭团 *Kadsura coccinea* 和匍匐酸藤子 *Embelia procumbens* 等^[10],群落叶面积指数为5.60^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 选择该地区具有代表性的常绿阔叶林群落,设立1 hm² (100 m×100 m)固定样地,样地为100 m×100 m(水平投影)的正方形,平均坡度为10°。将样地分为100个10 m×10 m的小样方进行调查,对胸径≥2 cm以上的乔木每木检尺、挂牌并定位,记录树种名、胸径、树高、冠幅等。根据重要值=相对频度+相对显著度+相对密度^[12],计算每个树种在群落中的重要值,并根据重要值计算结果(表1),将重要值排在前6位的树种定为优势种。2005年7月,对6种优势树种变色锥、南洋木荷、木果柯、蒙自连蕊茶、黄心树和景东冬青进行采样。为了避免对固定样地的破坏,在样地附近每个物种各选取6株样树,按叶、枝、干、皮、根等器官分别取样。取样标准如下:①树叶。分新、老叶采集,并将树冠从上到下分3层,按比例取样后混匀。②树枝。分老枝、新枝采集,并考虑东、西、南、北4个方位,采样时考虑树枝粗细比例,按比例取样。③树干。在距地面1.3 m处用生长锥取样。④树根。取直径小于1.5 cm的小根,取样时,从选定的个体基部沿着根的伸展向外挖取,在1.5 cm直径处截断,并沿着细根向外挖取尽可能多的样品,采样时考虑粗细比例。⑤树皮。距地面1.3 m处取主干的皮。将对取回的样品,按树种分器官,在80℃温度下烘干至恒量,粉碎过筛,进行养分测定。

表 1 1 hm² 固定样地常见树种的重要值

Table 1 Important value of common tree species in 1 hm² plot

种名	相对 优势度	相对 密度	相对 频度	重要值	种名	相对 优势度	相对 密度	相对 频度	重要值
变色锥 <i>Castanopsis rufescens</i>	20.60	5.84	6.95	33.39	大黄连 <i>Mahonia mairei</i>	0.02	1.92	2.41	4.35
南洋木荷 <i>Schima noronhae</i>	18.29	6.57	6.10	30.95	多果新木姜子 <i>Neolitsea polycarpa</i>	0.99	1.36	1.99	4.34
木果柯 <i>Lithocarpus xylocarpus</i>	20.23	1.92	2.84	24.99	硬壳柯 <i>Lithocarpus hancei</i>	1.71	0.72	0.85	3.28
蒙自连蕊茶 <i>Camellia Forrestii</i>	0.94	15.61	8.37	24.92	多花含笑 <i>Michelia floribunda</i>	0.49	0.40	0.57	1.46
黄心树 <i>Machilus bombycina</i>	9.78	5.12	6.67	21.57	宿鳞稠李 <i>Padus perulata</i>	0.92	0.16	0.28	1.36
景东冬青 <i>Ilex gantungensis</i>	2.04	8.41	7.66	18.10	红河冬青 <i>Ilex manneiensis</i>	0.56	0.32	0.43	1.31
薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	0.72	6.33	5.82	12.86	七裂槭 <i>Acer heptalobum</i>	0.32	0.32	0.57	1.21
红花木莲 <i>Manglietia insignis</i>	3.54	3.76	5.25	12.56	紫药女贞 <i>Ligustrum delawayanum</i>	0.29	0.32	0.43	1.04
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	0.73	5.68	5.82	12.23	水青树 <i>Tetracentran sinense</i>	0.63	0.16	0.14	0.93
滇润楠 <i>Machilus yunnanensis</i>	4.50	3.44	3.97	11.92	粗梗稠李 <i>Padus napaulensis</i>	0.47	0.16	0.28	0.91
大花八角 <i>Illicium macranthum</i>	2.17	4.16	5.25	11.59	长尾青冈 <i>Cyclobalanopsis stewardiana</i>	0.05	0.32	0.43	0.79
舟柄茶 <i>Hartia sinensis</i>	1.63	4.80	4.68	11.12	云南越橘 <i>Vaccinium duclouxii</i>	0.02	0.48	0.28	0.78
多花山矾 <i>Symplocos ramosissima</i>	0.19	5.92	4.96	11.08	柳叶润楠 <i>Machilus salicina</i>	0.02	0.32	0.43	0.77
斜基叶枹 <i>Eurya obliquifolia</i>	0.34	4.64	4.11	9.10	瑞丽鹅掌柴 <i>Schefflera shweliensis</i>	0.41	0.08	0.14	0.63
丛花山矾 <i>Symplocos poilanei</i>	0.17	4.24	3.12	7.54	景东枹 <i>Eurya jintungensis</i>	0.08	0.24	0.28	0.61
鸭公树 <i>Neolitsea chuui</i>	3.15	1.36	2.13	6.63	珊瑚冬青 <i>Ilex corallina</i>	0.05	0.16	0.28	0.50
南亚枇杷 <i>Eriobotrya bengalensis</i>	0.62	2.24	2.84	5.70	吴茱萸五加 <i>Acanthopanax evodiaefolius</i>	0.14	0.08	0.14	0.36
山青木 <i>Meliosma kirkii</i>	2.75	0.80	1.13	4.69					
波叶稠李 <i>Prunus undulata</i>	0.45	1.60	2.41	4.46	合计	100	100	100	300

1.2.2 植物全碳、全氮和全磷测定 植物全碳测定采用硫酸-重铬酸钾氧化容量法测定；植物全氮用浓硫酸-过氧化氢消煮后，用凯氏定氮法测定；植物全磷采用 HNO₃-HClO₄ 消解，氯化氢 (HCl) 溶解，ICP-AES 测定^[12]。

1.2.3 热值和灰分测定 干质量热值 (gross caloric value, GCV) 采用长沙三德仪器设备有限公司生产的 SSACM-IIIa 型量热仪测定，测量 3 次·样品⁻¹，平均误差不超过± 0.2 kJ·g⁻¹，取 3 次测定结果的平均值；灰分采用干灰化法测定，即样品在马福炉 550 ℃下灰化 4 h 后测定其灰分；去灰分热值(ash free caloric value, AFCV) 采用干质量热值和灰分质量分数计算，即去灰分热值=干质量热值/[（1 - 灰分质量分数）× 0.01]。

1.3 数据分析

采用 SPSS 10.0 软件对数据进行统计分析。相关分析与完全随机设计单因素方差分析 (one-way ANOVA) 之前，采用 Kolmogorov-Smirnov 检验对实验数据进行正态分布检验，并用最小显著差 (LSD) 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 植物各器官的热值特征

2.1.1 植物各器官干质量热值和去灰分热值 6 个树种不同器官间的干质量热值和去灰分热值分配规律有所不同：变色锥、南洋木荷、木果柯、黄心树和景东冬青干质量热值均以叶最大，而蒙自连蕊茶的干质量热值以枝最大(表 2)。变色锥各器官的干质量热值变化范围为 18.22 ~ 21.35 kJ·g⁻¹，各器官干质量热值变化顺序是叶>干>枝>根>皮；各器官去灰分热值为 19.23 ~ 22.15 kJ·g⁻¹，各器官去灰

分热值的次序是叶>枝>皮>干>根。南洋木荷各器官的干质量热值和去灰分热值的变化范围分别为 19.60 ~ 21.64 kJ·g⁻¹ 和 19.69 ~ 22.44 kJ·g⁻¹，各器官热值的顺序均为叶>皮>根>枝>干。木果柯各器官干质量热值为 20.90 ~ 23.49 kJ·g⁻¹，依次是叶>枝>干>皮>根；各器官去灰分热值为 21.20 ~ 24.20 kJ·g⁻¹，各器官依次为叶>枝>皮>干>根。蒙自连蕊茶各器官干质量热值为 19.01 ~ 20.07 kJ·g⁻¹，各器官依次为枝>干>根>皮>叶；各器官去灰分热值为 19.66 ~ 20.42 kJ·g⁻¹，依次为枝>皮>干>叶>根。黄心树各器官干质量热值为 19.49 ~ 21.82 kJ·g⁻¹，依次是叶>枝>根>皮>干；各器官去灰分热值为 19.62 ~ 22.65 kJ·g⁻¹，其大小依次为叶>枝>皮>根>干。景东冬青各器官干质量热值依次是叶>枝>根>皮>干；各器官去灰分热值为 19.51 ~ 21.79 kJ·g⁻¹，依次为叶>皮>枝>根>干。方差分析表明，6 种植物不同器官干质量热值和去灰分热值的种间差异均没有达到显著水平($P>0.05$)。

表 2 6 种优势植物不同器官的干质量热值、去灰分热值和灰分质量分数

Table 2 GCV, ash content and AFCV from different organs among six dominant tree species

植物	器官	干质量热值/ (kJ·g ⁻¹)	灰分/ (g·kg ⁻¹)	去灰分热值/ (kJ·g ⁻¹)	植物	器官	干质量热值/ (kJ·g ⁻¹)	灰分/ (g·kg ⁻¹)	去灰分热值/ (kJ·g ⁻¹)
变色锥	根	18.89 ± 0.11 bc	17.5 ± 1.1 c	19.23 ± 0.12 b	蒙自连蕊茶	根	19.36 ± 0.06 c	14.8 ± 1.2 b	19.66 ± 0.05 c
	干	19.41 ± 0.07 c	2.0 ± 0.4 d	19.45 ± 0.07 b		干	19.75 ± 0.02 b	8.0 ± 0.5 c	19.91 ± 0.02 b
	皮	18.22 ± 0.17 b	66.8 ± 3.6 a	19.52 ± 0.15 b		皮	19.24 ± 0.11 c	39.8 ± 1.1 a	20.04 ± 0.10 b
	枝	19.22 ± 0.12 b	38.0 ± 3.6 b	19.97 ± 0.11 b		枝	20.07 ± 0.05 a	17.2 ± 1.4 b	20.42 ± 0.07 a
	叶	21.35 ± 0.53 a	36.2 ± 1.6 b	22.15 ± 0.53 a		叶	19.01 ± 0.04 d	40.8 ± 0.6 a	19.81 ± 0.04 c
南洋木荷	根	20.60 ± 0.05 c	11.8 ± 1.0 c	20.32 ± 0.05 c	黄心树	根	20.03 ± 0.12 c	14.0 ± 1.4 c	20.31 ± 0.13 c
	干	19.60 ± 0.06 d	4.5 ± 0.4 d	19.69 ± 0.06 d		干	19.49 ± 0.03 dc	6.5 ± 0.2 c	19.62 ± 0.03 d
	皮	20.65 ± 0.18 b	26.5 ± 2.3 a	21.21 ± 0.15 b		皮	20.00 ± 0.20 c	40.3 ± 5.2 a	20.83 ± 0.12 b
	枝	19.68 ± 0.09 d	27.8 ± 1.8 a	20.24 ± 0.08 c		枝	20.57 ± 0.15 b	25.8 ± 2.1 b	21.11 ± 0.14 b
	叶	21.64 ± 0.21 a	21.2 ± 2.2 b	22.44 ± 0.20 a		叶	21.82 ± 0.11 a	36.7 ± 2.7 a	22.65 ± 0.10 a
木果柯	根	20.90 ± 0.04 c	14.2 ± 1.0 b	21.20 ± 0.03 d	景东冬青	根	19.64 ± 0.08 b	24.5 ± 2.1 c	20.14 ± 0.10 a
	干	21.27 ± 0.04 b	6.3 ± 0.9 c	21.40 ± 0.05 c		干	19.32 ± 0.09 c	9.5 ± 0.8 d	19.51 ± 0.10 b
	皮	21.24 ± 0.18 b	32.0 ± 2.2 a	21.94 ± 0.19 b		皮	19.56 ± 0.14 bc	68.5 ± 7.1 a	21.00 ± 0.07 c
	枝	21.47 ± 0.02 b	32.5 ± 1.8 a	22.19 ± 0.05 b		枝	19.74 ± 0.16 b	45.8 ± 5.4 b	20.68 ± 0.07 d
	叶	23.41 ± 0.13 a	32.8 ± 1.6 a	24.20 ± 0.09 a		叶	20.36 ± 0.05 a	65.3 ± 2.8 a	21.79 ± 0.05 e

说明：表中数据为平均值±标准差。数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

6 种植物平均干质量热值大小顺序为木果柯>南洋木荷>黄心树>景东冬青>蒙自连蕊茶>变色锥，和植物的优势度顺序并没有关系。各植物不同器官去灰热值也是以叶最大，而根或干最小。6 种植物各器官的去灰分热值变化范围为叶 19.81 ~ 24.20 kJ·g⁻¹，枝 19.97 ~ 22.19 kJ·g⁻¹，皮 19.52 ~ 21.94 kJ·g⁻¹，干 19.45 ~ 21.40 kJ·g⁻¹，根 19.23 ~ 21.20 kJ·g⁻¹。去灰分热值大小顺序为木果柯>黄心树>南洋木荷>景东冬青>变色锥>蒙自连蕊茶，和干质量热值的树种顺序有所不同。经方差分析，6 种植物不同器官干质量热值和去灰分热值的种间差异均没有达到显著水平。

哀牢山常绿阔叶林 6 个优势种的平均干质量热值(20.18 kJ·g⁻¹)高于西双版纳热带雨林优势种(18.59 kJ·g⁻¹)^[13]和西双版纳次生植物群落优势树种的热值(19.55 kJ·g⁻¹)^[14]，与黄钰辉等^[15]的研究结果接近(20.09 kJ·g⁻¹)。这一结果符合 Golley^[16-17]提出的世界范围内植被的热值由低纬度向高纬度、由低海拔向高海拔升高的规律。6 个优势种的平均去灰分热值(20.75 kJ·g⁻¹)，均远高于世界陆生植物的平均去灰分热值(11.77 kJ·g⁻¹)^[18]，说明哀牢山常绿阔叶林优势种具有较高热值，在储存、累积光能和各种营养元素方面存在优势，从另一方面证明了常绿阔叶林结构的稳定性。在比较 6 种优势植物的叶片热

值时, 无论是干质量热值还是去灰分热值, 木果柯最高, 其原因是木果柯树体高大, 是群落上层树种, 得到充足的光照, 而光照条件是决定植物热值大小的重要条件, 使叶片出现了最高热值。同时我们也发现, 蒙自连蕊茶干质量热值和去灰分热值不是以叶片最高, 而是以树枝最高。其原因可能是: 蒙自连蕊茶属小乔木, 是群落下层树种, 得不到充足的光照, 因此, 叶片上分配不到很大比例能量; 另外, 也与该类植物的树枝含有某些特异性物质有关, 具体原因有待于深入探讨。

2.1.2 不同植物各器官的灰分 灰分是植物体内各种无机元素的氧化物的总和^[19]。由表 2 可知, 6 种植物不同器官灰分为 $2.0 \sim 68.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中变色锥干最低, 景东冬青皮最高。皮和叶具有较高的灰分, 且皮平均灰分($45.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)总体高于叶平均灰分($38.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。6 种植物灰分种间差异显著($P < 0.05$)。各植物不同器官的灰分测定结果: 叶的灰分为 $32.8 \sim 65.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中木果柯叶的灰分最低, 为 $32.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而景东冬青最高, 为 $65.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 二者相差 49.8%。各植物叶灰分变化顺序是景东冬青 > 蒙自连蕊茶 > 黄心树 > 变色锥 > 南洋木荷 > 木果柯; 枝的灰分为 $17.2 \sim 48.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化顺序是景东冬青 > 变色锥 > 木果柯 > 南洋木荷 > 黄心树 > 蒙自连蕊茶; 皮灰分为 $26.5 \sim 68.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化顺序是景东冬青 > 变色锥 > 黄心树 > 蒙自连蕊茶 > 木果柯 > 南洋木荷; 干灰分为 $2.0 \sim 9.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化顺序是景东冬青 > 蒙自连蕊茶 > 黄心树 > 木果柯 > 南洋木荷 > 变色锥; 根灰分为 $11.8 \sim 24.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化顺序是景东冬青 > 变色锥 > 蒙自连蕊茶 > 木果柯 > 黄心树 > 南洋木荷。很多学者认为, 灰分质量分数的差异是干质量差异的重要原因, 对不同植物种类或不同生境下的同种植物的热值比较时, 应采用去灰分热值以消除灰分质量分数差异造成的影响^[20], 但灰分质量分数的高低本身就是植物种和环境共同作用的结果, 单纯采用去灰分热值进行比较可能削弱了物种之间的差异^[21]。

2.1.3 不同植物各器官的养分质量分数 在植物生长过程中, 各器官所起的作用各不相同, 因而对养分的质量分数也很不相同, 各器官养分的质量分数存在着明显的差异。叶作为光合作用的营养器官, 在植物的生长过程中, 生命活动最为活跃^[22], 起着极其重要的作用。6 种优势植物中, 除变色锥的干、蒙自连蕊茶的枝和景东冬青的根全碳质量分数大于叶之外, 其余部位的全碳质量分数都小于叶, 全氮和全磷质量分数叶明显高于其他部位(表 3)。各植物叶的营养元素质量分数顺序为全碳 $563.17 \sim 496.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 南洋木荷 > 黄心树 > 木果柯 > 变色锥 > 景东冬青 > 蒙自连蕊茶; 全氮 $20.03 \sim 12.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变色锥 > 木果柯 > 黄心树 > 南洋木荷 > 景东冬青 > 蒙自连蕊茶; 全磷 $1.18 \sim 0.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 黄心树 > 木果柯 > 变色锥 > 景东冬青 > 南洋木荷 > 蒙自连蕊茶。不同植物种类各器官全碳、全氮和全磷的质量分数不一样, 差异也较大, 而且某养分质量分数的多少可能会影响到另一些养分的质量分数。6 种植物叶的全碳、全氮和全磷质量分数种间差异均没有达到显著水平($P > 0.05$)。

2.2 不同植物各器官热值与养分和灰分质量分数的相关关系

由表 4 可以看出, 植物干质量热值、去灰分热值与养分和灰分相关性因器官而异。6 种植物的各个器官干质量热值与灰分相关性最强, 均达到极显著水平($P < 0.01$)。叶的干质量热值、去灰分热值与养分和灰分均存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)相关性。其中叶的去灰分热值和全氮、灰分为负相关关系外, 其余均为正相关关系。养分元素中全碳和各器官相关性最强, 也从另一方面证明了碳是植物各器官能量的主要成分。

总之, 对亚热带常绿阔叶林的热值与养分特征研究目前开展不多, 尚需要在大量积累资料的基础上深入进行。本研究为探讨哀牢山常绿阔叶林的能量特征和生态效率提供基础资料和科学依据, 也为中国西部亚热带常绿阔叶林保护提供理论基础。

3 结论

本研究的主要结论可以归纳为 4 点: ①变色锥、南洋木荷、木果柯、蒙自连蕊茶、黄心树和景东冬青等 6 种植物不同器官干质量热值变化范围如下: 叶为 $19.01 \sim 23.41 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 枝 $19.22 \sim 21.47 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 皮 $18.22 \sim 21.24 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 干 $19.32 \sim 21.27 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 根 $18.89 \sim 20.90 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。②6 种植物平均干质量热值大小顺序为木果柯 > 南洋木荷 > 黄心树 > 景东冬青 > 蒙自连蕊茶 > 变色锥, 去灰分热值大小顺序为木果柯 > 黄心树 > 南洋木荷 > 景东冬青 > 变色锥 > 蒙自连蕊茶, 各树种干质量热值和去灰分热值的大小

表 3 6 种优势植物不同器官的全碳、全氮和全磷质量分数

Table 3 Content of C, N and P from different organs among six dominant tree species

植物	器官	全碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	植物	器官	全碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)
变色锥	根	504.17 ± 2.59 b	4.63 ± 0.38 d	0.29 ± 0.01 c	蒙自连蕊茶	根	513.67 ± 7.57 b	3.90 ± 0.52 c	0.56 ± 0.07 c
	干	529.17 ± 2.17 a	2.09 ± 0.22 e	0.07 ± 0.01 d		干	532.67 ± 2.51 a	1.36 ± 0.07 d	0.17 ± 0.02 b
	皮	485.00 ± 4.86 c	6.54 ± 0.28 c	0.33 ± 0.02 c		皮	526.00 ± 4.84 a	6.89 ± 0.13 b	0.49 ± 0.02 c
	枝	482.50 ± 7.04 c	7.80 ± 0.57 b	0.78 ± 0.08 b		枝	532.83 ± 4.66 a	4.89 ± 0.54 c	0.66 ± 0.13 a
	叶	506.50 ± 3.91 b	20.03 ± 0.27 a	1.03 ± 0.04 a		叶	496.17 ± 2.89 c	12.77 ± 0.47 a	0.82 ± 0.03 a
南洋木荷	根	524.00 ± 4.23 c	3.12 ± 0.28 d	0.25 ± 0.03 b	黄心树	根	511.50 ± 4.90 bc	3.20 ± 0.32 d	0.29 ± 0.08 c
	干	519.50 ± 4.04 c	0.76 ± 0.05 e	0.07 ± 0.01 c		干	498.50 ± 6.57 c	1.09 ± 0.10 d	0.09 ± 0.02 c
	皮	549.50 ± 4.93 b	4.26 ± 0.37 c	0.26 ± 0.03 b		皮	527.33 ± 6.43 b	5.73 ± 0.49 c	0.66 ± 0.17 ab
	枝	529.83 ± 4.39 c	6.43 ± 0.47 b	0.77 ± 0.09 a		枝	531.00 ± 5.99 b	8.33 ± 0.93 b	0.93 ± 0.12 a
	叶	563.17 ± 4.43 a	16.13 ± 0.32 a	0.83 ± 0.03 a		叶	561.67 ± 3.29 a	18.30 ± 1.36 a	1.18 ± 0.09 a
木果柯	根	481.00 ± 6.26 b	4.41 ± 0.46 c	0.54 ± 0.12 b	景东冬青	根	505.67 ± 3.34 a	2.95 ± 0.23 c	0.44 ± 0.06 c
	干	487.67 ± 2.89 b	1.64 ± 0.16 d	0.10 ± 0.02 c		干	483.00 ± 1.98 b	1.67 ± 0.11 cd	0.78 ± 0.03 b
	皮	497.00 ± 4.28 ab	6.91 ± 0.41 b	0.22 ± 0.02 c		皮	492.00 ± 7.41 a	4.16 ± 0.25 c	0.29 ± 0.03 c
	枝	505.33 ± 7.75 a	7.38 ± 0.19 b	1.11 ± 0.12 a		枝	501.50 ± 3.94 a	8.31 ± 0.69 b	0.81 ± 0.13 a
	叶	515.67 ± 5.87 a	18.74 ± 0.90 a	1.12 ± 0.08 a		叶	499.33 ± 5.93 a	14.86 ± 0.62 a	0.99 ± 0.09 a

说明：表中数据为平均值±标准差。数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

表 4 6 种植物各器官的干质量热值与去灰分热值与养分和灰分质量分数相关关系

Table 4 Correlation coefficients between GCV, AFCV and nutrients, ash contents of each organ from six tree species

器官	全碳		全氮		全磷		灰分	
	干质量热值	去灰分热值	干质量热值	去灰分热值	干质量热值	去灰分热值	干质量热值	去灰分热值
根	-0.270	-0.285	-0.118	-0.120	0.094	0.132	0.988**	-0.273
干	-0.317	-0.357*	0.071	0.063	-0.063	-0.015	0.997**	0.076
皮	0.414*	0.235	-0.133	-0.222	-0.192	-0.254	0.944**	-0.727**
枝	0.286	0.097	-0.039	0.161	0.320	0.412*	0.953**	-0.314
叶	0.438**	0.393*	0.565**	-0.554**	0.361*	0.405*	0.986**	-0.482**

说明：* 为 $P<0.05$ ，** 为 $P<0.01$ 。

顺序与测定群落植物的优势种顺序变化并没有关系。③不同植物种类各器官全碳、全氮和全磷的质量分数不一样，差异也较大。6 种植物全碳质量分数南洋木荷的叶最高为 $563.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，木果柯的根最低为 $481.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全氮质量分数变色锥的叶最高为 $20.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，南洋木荷的干最低为 $0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全磷质量分数黄心树的叶最高为 $1.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变色锥和南洋木荷的干最低为 $0.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此，养分质量分数因物种而异。④6 种优势植物的各个器官干质量热值与灰分质量分数相关性最强，均达到极显著水平($P<0.01$)。叶的干质量热值、去灰分热值与养分和灰分均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关性，其中叶的去灰分热值和灰分为负相关关系外，其余均为正相关关系。

致谢：哀牢山亚热带森林生态系统研究站提供了基本的研究条件和经费支持，云南省景东县自然保护区管理局给予了大量帮助，在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 何晓, 包维楷, 辜彬, 等. 中国高等植物干质量热值特点[J]. 生态环境, 2007, 16 (3): 973 – 981.
HE Xiao, BAO Weikai, GU Bin, *et al.* The characteristic of gross caloric values of higher plants in China [J]. *Ecol Environ*, 2007, 16 (3): 973 – 981.
- [2] 孙国夫, 郑志明, 王兆骞. 水稻热值的动态变化研究[J]. 生态学杂志, 1993, 12 (1): 1 – 4.
SUN Guofu, ZHENG Zhiming, WANG Zhaoqian. Dynamics of calorific values of rice [J]. *Chin J Ecol*, 1993, 12 (1): 1 – 4.
- [3] 林益明, 林鹏, 李振基, 等. 福建武夷山甜槠群落能量的研究[J]. 植物学报, 1996, 38 (12): 989 – 994.
LIN Yiming, LIN Peng, LI Zhenji, *et al.* Study on energy of *castanopsis eyrei* community in Wuyi Mountains [J]. *Acta Bot Sin*, 1996, 38 (12): 989 – 994.
- [4] 彭培好, 王金锡, 胡振宇, 等. 人工桉柏混交林生态系统的能量特征[J]. 应用生态学报, 1998, 9 (2): 113 – 118.
PENG Peihao, WANG Jinxi, HU Zhenyu, *et al.* Energy characteristics of alder cypress mixed plantation ecosystem [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1998, 9 (2): 113 – 118.
- [5] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分[J]. 生态学报, 1999, 19 (6): 832 – 836.
LIN Chengchao. Calorific values and nutrient composition of the leaves of monsoon evergreen broad-leaved forest and some forest-edge plants on Gushan Mountain in Fuzhou [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, 19 (6): 832 – 836.
- [6] 徐永荣, 张万均, 冯宗炜, 等. 天津滨海盐渍土上几种植物的热值和元素含量及其相关性[J]. 生态学报, 2003, 23 (2): 450 – 455.
XU Yongrong, ZHANG Wanjuan, FENG Zongwei, *et al.* Caloric values, elemental contents and correlations between them of some plants on sea-beach salinity soil in Tianjin, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, 23 (2): 450 – 455.
- [7] 林益明, 郭启荣, 叶功富, 等. 福建东山几种木麻黄的物质与能量特征[J]. 生态学报, 2004, 24 (10): 2217 – 2225.
LIN Yiming, GUO Qirong, YE Gongfu, *et al.* Characteristics of matter and energy of some *Casuarinaceae* species in Dongshan County, Fujian Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, 24 (10): 2217 – 2225.
- [8] 方运霆, 莫江明, 李德军, 等. 鼎湖山马尾松群落能量分配及其生产的动态[J]. 广西植物, 2005, 25 (1): 26 – 32.
FANG Yunting, MO Jiangming, LI Dejun, *et al.* Dynamics of energy distribution and its production of a *Pinus massoniana* community in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Guihaia*, 2005, 25 (1): 26 – 32.
- [9] LIU Wenyao, FOX J E D, XU Zaifu. Biomass and nutrient accumulation in montane evergreen broad-leaved forest (*Lithocarpus xylocarpus* type) in Ailao Mountains, SW China [J]. *For Ecol Manage*, 2002, 158: 223 – 235.
- [10] 巩合德, 张一平, 刘玉洪, 等. 哀牢山常绿阔叶林土壤水分动态变化研究[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36 (1): 53 – 54.
GONG Hede, ZHANG Yiping, LIU Yuhong, *et al.* Dynamics of soil moisture in evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain [J]. *J Northeast For Univ*, 2008, 36 (1): 53 – 54.
- [11] 巩合德, 张一平, 刘玉洪, 等. 哀牢山常绿阔叶林林冠截留特征研究[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25 (4): 469 – 474.
GONG Hede, ZHANG Yiping, LIU Yuhong, *et al.* Interception capability in an evergreen broad-leaved forest of Ailaoshan, Yunnan Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, 25 (4): 469 – 474.
- [12] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1 – 196.
- [13] 林华, 曹敏, 张建侯. 中国西南地区热带季节雨林及山地常绿阔叶林热值及能量分配格局[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (6): 1103 – 1110.
LIN Hua, CAO Min, ZHANG Jianhou. Caloric values and energy allocation of a tropical seasonal rain forest and a montane evergreen broad-leaved forest in southwest China [J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31 (6): 1103 – 1110.
- [14] 乔秀娟, 曹敏, 林华. 西双版纳不同林龄次生植物群落优势树种的热值[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (2): 326 – 332.
QIAO Xiujuan, CAO Min, LIN Hua. Caloric values allocation of dominant species in four secondary forests at different ages in Xishuangbanna, southwest China [J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31 (2): 326 – 332.
- [15] 黄钰辉, 官丽莉, 周国逸, 等. 西双版纳热带季节雨林和哀牢山中山湿性常绿阔叶林优势植物及地表凋落物层的热值[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (3): 457 – 463.
HUANG Yuhui, GUAN Lili, ZHOU Guoyi, *et al.* Gross caloric values of dominant species and litter layer in midmontane moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain and in tropical season rain forest in Xishuangbanna, Yunnan,

- China [J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31** (3): 457 – 463.
- [16] GOLLEY F B. Energy values of ecological materials [J]. *Ecology*, 1961, **42** (3): 581 – 584.
- [17] GOLLEY F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation [J]. *Ecology*, 1969, **50** (3): 517 – 519.
- [18] 杨福国, 何海菊. 高寒草甸地区常见植物热值的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, **7** (4): 280 – 287.
- YANG Futun, HE Haiju. The preliminary study on the calorific value of the frequently plants in high and cold meadow area [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1983, **7** (4): 280 – 287.
- [19] 谭忠奇, 林益明, 丁印龙, 等. 5 种丛生状棕榈植物叶热值的月变化研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (7): 1135 – 1138.
- TAN Zhongqi, LIN Yiming, DING Yinlong, *et al.* Monthly changes in caloric values of five shrubby Palmae species leaves [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (7): 1135 – 1138.
- [20] 林益明, 李和阳, 林鹏, 等. 福建南靖虎伯寮亚热带雨林竹类植物热值的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2000, **19** (1): 57 – 62.
- LIN Yiming, LI Heyang, LIN Peng, *et al.* Caloric values of bamboo species in the subtropical rain forests at Huboliao of Nanjing County, Fujian [J]. *J Bamboo Res*, 2000, **19** (1): 57 – 62.
- [21] 徐永荣, 冯宗炜, 朱敬恩. 武汉和天津园林植物叶片热值比较研究[J]. 生态学杂志, 2004, **23** (6): 11 – 14.
- XU Yongrong, FENG Zongwei, ZHU Jing'en. Comparison of foliage caloric values of garden plants in Wuhan and Tianjin, China [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **23** (6): 11 – 14.
- [22] 吴家森, 张立钦, 冯进才, 等. 南方红豆杉幼苗营养元素质量分数与分布[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25** (2): 195 – 199.
- WU Jiasen, ZHANG Liqin, FENG Jincai, *et al.* Macronutrients and allocations to different organs in one-to three-year-old *Taxus chinensis* var. *maire* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25** (2): 195 – 199.